

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656279

研究課題名(和文) エネルギー吸収機能と残留変形の自己修復機能を併せ持つ鋼製橋脚の開発

研究課題名(英文) Development of steel pier with energy dissipation capacity and self-restoring capacity to reduce residual deformation

研究代表者

後藤 芳顕 (GOTO, Yoshiaki)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90144188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：都市内高架橋の地震時の安全性と地震後の使用性確保のためにエネルギー吸収機能と残留変形の自己修復機能を併せ持つ橋脚として、2枚の内部支圧拘束板を導入した低コストCFT橋脚の開発を行った。まず、静的繰り返し載荷実験、加振実験ならびにFE解析で鋼管、ダイヤフラム、充填コンクリートなどのパラメータが橋脚のエネルギー吸収機能と自己修復機能に与える影響を詳細に検討した。つぎに、両機能が効果的に発現するCFT鋼脚として、充填コンクリートの主要な水平ひび割れの開閉によるひび割れ面の圧壊防止のためにひび割れ位置に2枚の支圧拘束板挿入した構造をFE解析で設定した。この構造の妥当性は繰り返し載荷実験により検証した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a low cost CFT pier with two internal bearing plates was developed such that the pier assumes high energy dissipation capacity along with self-restoring capacity to reduce residual deformations. First, it was extensively investigated by cyclic loading test, shake table test and a FE analysis how the material and geometrical parameters of outer steel pipe, diaphragms and in-filled concrete affect the energy dissipation capacity and self-restoring capacity. Second, based on the FE analysis, a new CFT pier model was proposed. In this CFT pier, two internal bearing plates were inserted into the location of a major crack of the in-filled concrete in order to prevent the failure of the crack surfaces caused by their cyclic closing and opening. Finally, the validity of the new CFT pier model was confirmed by a cyclic loading test.

研究分野：構造工学，耐震工学

キーワード：自己修復 コンクリート充填橋脚 残留変位 局部座屈

1. 研究開始当初の背景

都市内高架橋は地震時の安全性のみならず、地震後の早急な使用性回復が必須である。とくに、補修工事が困難な橋脚においては残留変位の発生を極力防ぐことが要求される。この要求に対応するため、免震や制震デバイスを導入したり、橋脚断面を増大させたりして作用応力を低減し、橋脚の損傷を抑える方法が用いられる。しかしながら、前者は高架橋システムとしての振動特性に依存するので、ロバスト性に欠ける問題がある。また、後者は橋脚のエネルギー吸収能が低下し、増大した地震力により応力集中部でのき裂発生リスクが高まる。そこで、鋼製橋脚を対象にエネルギー吸収機能を確保しつつ、残留変形の自己修復機能をもつ低コストの橋脚を開発する必要がある。申請者らは高精度解析法と3次元振動台による加振実験により鋼製脚の動的な耐震性能を世界で初めて明らかにした。この過程で、ダイヤフラムで拘束するコンクリート部分充填鋼脚(CFT 橋脚)が高いエネルギー吸収能に加えて、従来の変位制御による準静的繰り返し実験では見逃されていた残留変形の自己修復機能を持つことを発見し、数値解析によりそのメカニズムを解明した。すなわち、無充填鋼脚の場合は局部座屈が生じると変位が単調に増大し倒壊するが、部分充填鋼脚の場合は、一旦、鋼管の局部座屈を伴う塑性変位が増大するが繰り返し荷重下では自己修復機能により変位が減少し、最終的な残留変位は小さく抑えられる。

2. 研究の目的

本研究では、まず、充填コンクリート、鋼管、ダイヤフラムなどのパラメータが橋脚のエネルギー吸収機能と自己修復機能に与える影響を解明することを目的とした。つぎに、両機能が効果的に発現する低コストの高性能 CFT 鋼脚として、充填コンクリートの圧壊防止や鋼管の低サイクル疲労防止のための支圧拘束板を導入した CFT 橋脚の最適構造の検討と実験による妥当性検証を目的とした。

3. 研究の方法

静的繰り返し実験や加振実験により一般的な多方向地震動下での CFT 橋脚の自己修復機構やエネルギー吸収機構の詳細に観察するとともに、これに基づくキャリブレーションで FE モデルの精緻化を計る。そして充填コンクリートの圧壊防止用の支圧拘束板を用いた構造を対象に FE モデルによる数値解析で自己修復機構とエネルギー吸収能の観点から最適な構造を設計する。この構造について実験を実施することで妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1)多方向地震動下での CFT 橋脚の自己修復機能とエネルギー吸収能機能の解明

一方向地震動下での CFT 橋脚の自己修復

機能とエネルギー吸収能機能については解析のみならず実験でも確認している。ここでは、実際の橋脚が受ける水平2方向地震動下でも同様な機能が発揮されることを静的2方向繰り返し載荷実験ならびに水平2方向同時加振実験により検証した。さらに FE モデルの精度も検討した。

静的繰り返し実験に用いた CFT 橋脚供試体を図-1 に示す。このほか、比較のため無充填供試体も用いた。水平2方向繰り返し載荷は図-2 に示す螺旋載荷を用い、比較のために両振りの水平1方向繰り返し載荷も実施した。なお、無充填橋脚は螺旋載荷のみである。結果として、各載荷に対する CFT 橋脚、無充填橋脚の履歴挙動を水平2方向ならびに鉛直方向について図-3 に示す。また、水平復元力合力と累積吸収エネルギーの関係を図-4 に示す。図-3、図-4 には FE モデルによる解析結果も示している。これより、水平1方向繰り返し載荷のみならず一般的な螺旋載荷においても CFT 橋脚では無充填橋脚に比べ図-3 のように修復機構による明確な鉛直変位の戻りがあることや図-4 のようにエネルギー吸収能があることを確認できる。また、FE モデルは上記の挙動を精度よく表すことが判明した。

さらに、図-5 に示す単柱供試体による CFT 橋脚と無充填橋脚の振動台を用いたより現実に近い条件下の図-6 の2方向同時加振実験を実施した(CFT: Tsugaru 3×(LG+TR)、無充填:Tsugaru 2.25×(LG+TR))。実験結果として応答水平変位成分を図-7 に示す。これより、無充填橋脚では倒壊に至っているが、より強い地震動を入力した CFT 橋脚では最大応答変位は大きいにもかかわらず、残留変位は非常に小さくなっていることがわかる。

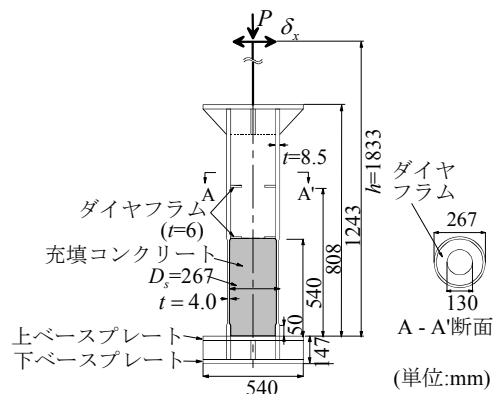


図-1 CFT 橋脚供試体(静的繰り返し試験)

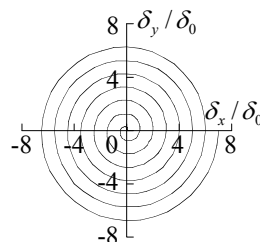
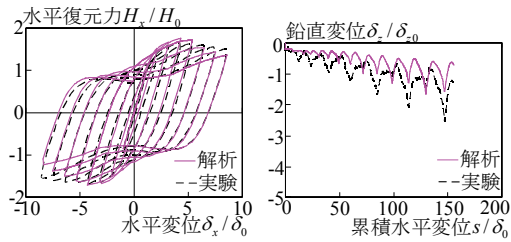
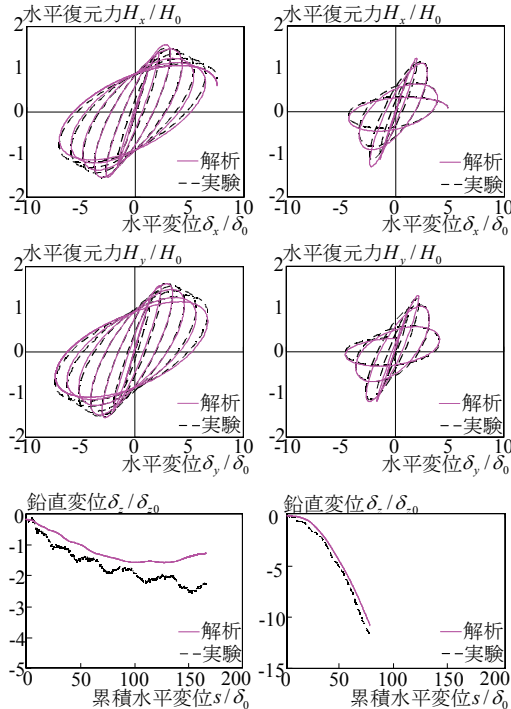


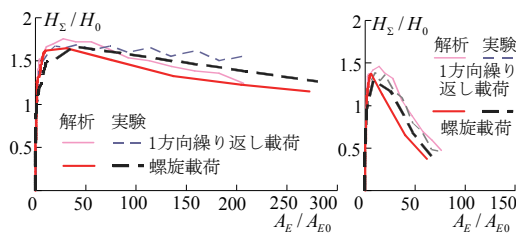
図-2 載荷プログラム(螺旋載荷)



(a) CFT・一方向繰り返し荷



(b) CFT・螺旋荷 (c)無充填・螺旋荷
図-3 CFT 橋脚実験での履歴挙動



(a) CFT (b) 無充填

図-4 水平復元力合力-吸収エネルギー関係

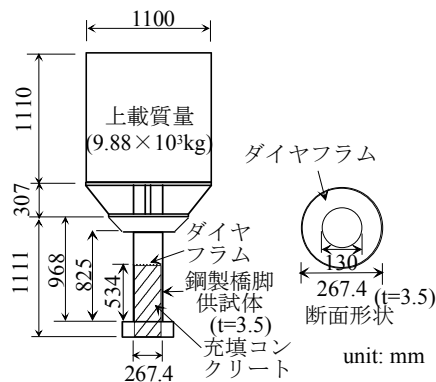
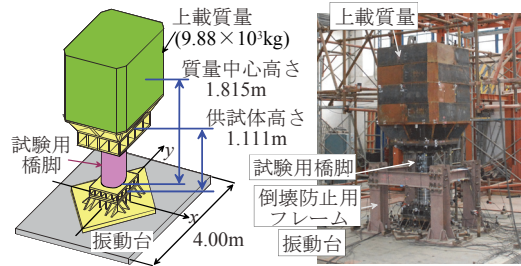
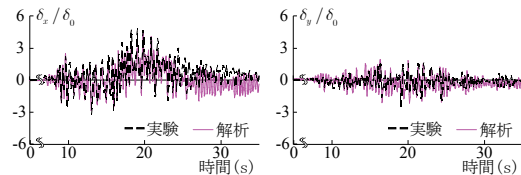


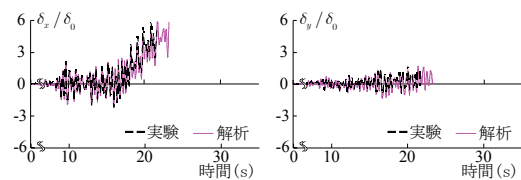
図-5 CFT 橋脚供試体(加振実験)



(a) 概念図 (b) 写真
図-6 加振実験



(a) CFT 橋脚



(b) 無充填橋脚

図-7 水平変位時刻歴応答

(2)CFT 橋脚への支圧拘束板の有効性の解明

CFT 橋脚の内部水平ひび割れ発生位置にあらかじめ 2 枚の支圧拘束板(鋼板)を挿入することで、繰り返し荷時のひび割れの開閉をスムーズにするとともに、ひび割れ界面に作用する圧縮応力を分散することでコンクリートの圧壊を防ぐ CFT 橋脚(図-8)を最適設計し、その有効性を実験により検討した。この支圧拘束板はスタッドで両側のコンクリート界面のみに接合されているだけで鋼管には接合されておらず、曲げ引張り作用時には 2 枚の支圧鋼板は自由に離間する。なお、当初の計画では低サイクル疲労防止のためにコンクリート充填部に超塑性合金を用いる構造(図-8)も検討予定であったが、後に示すように普通鋼材でも十分な変形性能があることが判明したので高コストの超塑性合金を用いる構造の検討は中止した。

FE 解析で効果的な支圧拘束板の挿入位置と板厚を設定した供試体を図-9 に示す。ここでは、製作の容易さから正方形断面の橋脚(鋼管部分 SM400(公称降伏点 235MPa, 公称引張り強度 400MPa, 実測降伏点 299MPa, 実測引張り強度 490MPa): パネルの径厚比パラメータ $R_R = 0.7$, 細長比パラメータ $\lambda = 0.75$, 軸力比 $P/P_0 = 0.15$, ダイアフラム間隔=パネル幅の 2 倍, コンクリート部分: 設計圧縮強度 $f'_c = 18\text{MPa}$, 実測圧縮強度 23.4MPa, 充填高さ=パネル幅の 2 倍の位置のダイアフラム位置までコンクリート充填)を用いた。供試体は 2 種類の支圧拘束板(6mm, 12mm)を導入した 2 体の CFT 橋脚模型と比較のための支圧拘束

板を設けない1体のCFT橋脚からなる。荷重は一方方向の両振り荷重で初期降伏変位 δ_0 をもとに水平変位の振幅を $\pm 1\delta_0, \pm 2\delta_0, \pm 3\delta_0, \dots$ と増加させた。得られた水平変位 δ と水平復元力 H の関係を図-10に示す。これより、CFT橋脚はいずれも最大耐力到達後の包絡線の荷重低下が小さく、優れたエネルギー吸収能と変形能を持っていることがわかる。とくに、支圧拘束板(6mm, 12mm)を導入したCFT橋脚では $\pm 10\delta_0$ 以後の荷重低下が支圧拘束板がないものに比べ明らかに小さく、エネルギー吸収能、変形性能が改善されることがわかる。このように、支圧拘束板を用いると最大荷重の上昇がなく、ピーク点以降の荷重低下を防止することでエネルギー吸収能を改善するという理想的な挙動が可能になる。なお、支圧拘束板の厚さによる差はほとんどなく、本供試体の場合は6mmで十分である。

CFT橋脚の鋼パネルに発生する低サイクル疲労によるき裂については、支圧拘束板の有無によらずいずれの供試体も $\pm 15\delta_0$ で柱基部の四隅のパネル側溶接止端部に水平な微小き裂が観察され、 $\pm 18 \sim 20\delta_0$ で比較的大きな水平方向き裂(図-12)に進展するが荷重を終了した $\pm 22\delta_0$ までは明瞭な耐力低下は生じていない。このように初期き裂の発生は $\pm 15\delta_0$ とかなり遅く、十分なエネルギー吸収能をもつこと、さらにき裂発生後の荷重低下も小さいことから適切に設計すれば本構造では特に低サイクル疲労を防止するための高価な構造(超塑性合金)は用いる必要がないことも判明した。

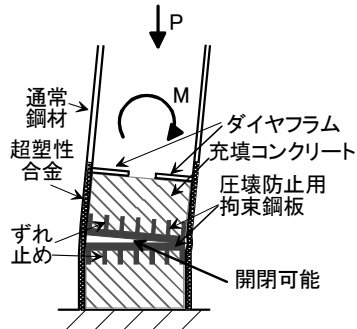


図-8 支圧拘束板を導入した CFT 橋脚

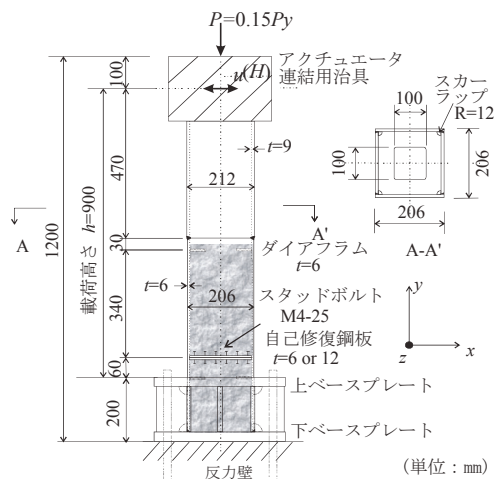
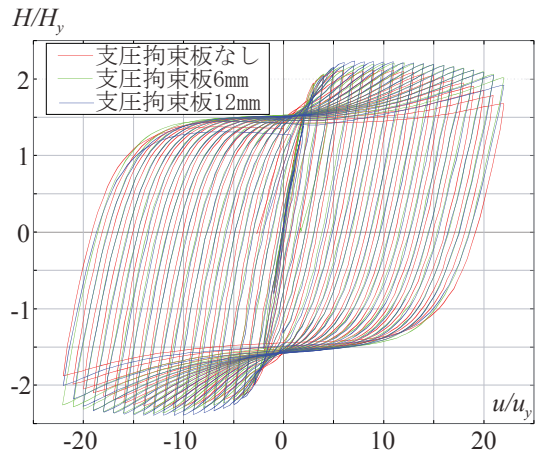
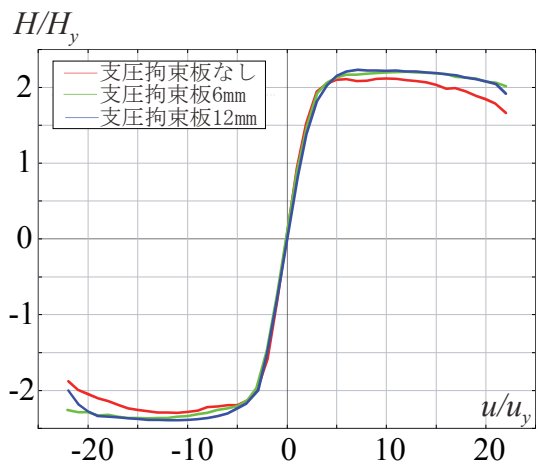


図-9 支圧拘束板付き橋脚供試体



(a) 荷重-変位関係



(b) 荷重-変位関係の包絡線

図-11 支圧拘束板導入による効果



図-12 溶接止端部でのき裂 (支圧拘束板(板厚 12mm)供試体)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ①後藤芳顕, 関一優, 海老澤健正, 呂西林, 地震動下のコンクリート充填円形断面鋼製橋脚における局部座屈変形の進展抑制機構と耐震性向上, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.1, pp.101-120, 査読有, 2013.
- ② Ghosh Prosenjit Kumar, Yoshiaki Goto, Hysteretic Behavior of Thin-walled Circular CFT Columns under Bidirectional Cyclic Load, pp.223-230, 査読有, 2012.
- ③ Yoshiaki Goto, Takemasa Ebisawa and Xilin Lu, Local Buckling Restraining Behavior of Thin-Walled Circular CFT Columns under

Seismic Loads, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.140, No.5, pp. 04013105-1 – 14, doi: 10.1061/(ASCE)ST. 1943-541X.0000904, 査読有, 2014.

〔学会発表〕 (計 5 件)

① Ghosh Prosenjit Kumar, Yoshiaki Goto, Hysteretic Behavior of Thin-walled Circular CFT Columns under Bidirectional Cyclic Load, 10th Intl. Conf. on Advances in Steel Concrete Composite and Hybrid Structures, 2012 年 07 月 02 日, シンガポール.

② 海老澤健正, 後藤芳顕, 長田直也, 関一優, コンクリート充填円形断面鋼製橋脚の自己修復特性に関する検討, 第 67 回土木学会年次学術講演会, 2012 年 09 月 05 日, 名古屋大学(愛知県名古屋市).

③ 海老澤健正, 後藤芳顕, 金井宏英, コンクリート部分充填円形断面橋脚における高軸力比が耐震性能に与える影響, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013 年 09 月 04 日, 日本大学(千葉県習志野市).

④ 金井宏英, 後藤芳顕, 海老澤健正, コンクリート部分充填矩形断面鋼製橋脚における中間ダイヤフラムの省略と耐震性能, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013 年 09 月 04 日, 日本大学(千葉県習志野市).

⑤ 曾我麻衣子, 松岡陵平, 後藤芳顕, 海老澤健正, 実大 CFT 橋脚における耐震性能と寸法効果に関する解析的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014 年 09 月 10 日, 大阪大学(大阪府豊中市).

〔図書〕 (計 1 件)

① Yoshiaki Goto, Chapter 10 Seismic Design of Thin-Walled Steel and CFT Piers, Seismic Design, Bridge Engineering Handbook (second edition) edited by Wai-Fah Chen, Lian Duan, CRC Press Taylor & Francis Group, pp.337-379, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 芳顕 (GOTO, Yoshiaki)
名古屋工業大学・工学研究科・教授
研究者番号：9 0 1 4 4 1 8 8

(2) 研究分担者

海老澤 健正 (EBISAWA, Takemasa)
名古屋工業大学・工学研究科・助教
研究者番号：9 0 3 3 2 7 0 9

(3) 連携研究者

井上 純哉 (INOUE, Junya)
東京大学・工学系研究科・准教授
研究者番号：7 0 3 1 2 9 7 3